

基于超效率 DEA—ESDA 的中国生态效率时空格局分析*

王丽琼

(泉州师范学院 资源与环境科学学院, 福建 泉州 362000)

摘要:采用改进的数据包络分析法(超效率 DEA)计算出中国 30 个省在不同时期的生态效率,运用全局和局部空间相关分析方法(ESDA)研究中国生态效率的空间自相关性和空间异质性。结果表明:中国生态效率东、中、西区域差异明显,东部发达地区生态效率高,中西部欠发达地区生态效率低;2004—2012 年全局自相关 Moran's I 值均为正数,表明省域之间生态效率呈现正相关的空间集聚分布,2004—2012 年生态效率的空间聚集程度先略有缩小后加强;区域生态效率的空间异质性主要表现为生态效率的“热点”区相对稳定,主要集中在北部、东部和南部沿海地区,“冷点”区主要集中在东北、大西南、大西北、长江中游和黄河中游地区;生态效率的空间差异与区域经济发展水平、产业结构和能源消耗强度等密切相关,基于空间探索性数据分析方法研究我国区域生态效率的空间异质性,为国家制定提高区域生态效率相关调控政策提供参考。

关键词:生态效率;超效率 DEA-ESDA;全局自相关;局部自相关

中图分类号:X22

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2015)05-0152-06

随着社会的发展,人们越来越重视经济和环境的关系,并关注可持续发展,国内外环境专家学者们遂提出生态效率这一概念来评价区域的可持续发展,并对生态效率的概念、测算以及影响因素等开展了卓有成效的基础性研究。生态效率反映了区域经济发展有效利用资源减轻环境压力的效率,是区域可持续发展的重要测度指标^[1]。经合组织(OECD)通过更少的资源投入获得更多的价值产出来定义生态的高效率,具体为投入要素(资源投入、资本投入、科学技术等)当前情况下,使资源消耗、环境破坏最小化前提下产出工业附加值最大化^[2],Kobayashi 和 Grossman 等提出基于径向投影决策单元的 DEA 评价方法测算生态效率并研究生态效率与城市产业结构的关系^[3]。国内王恩旭等运用超效率 DEA 模型对中国 30 个地区 1995—2007 年的生态效率进行了测度,研究区域生态效率的差异^[4];付丽娜等以长株潭“3+5”城市群为研究对象,运用超效率 DEA 方法测算了 2005—2010 年的城市生态效率,然后建立基于面板数据 Tobit 模型考察不同因素对效率的影响^[5]。以上研究多采用经济计量方法分析各区域生态效率评价方法及影响因素,研究中更多考虑生态效率时空上的分布特点和规律,缺乏对空间单元相互间的依赖性和异质性进行分析。本研究将通过改进的数据包络分析法(超效率 DEA)评价模型,对我国 30 个省区的生态效率进行测度,并将采用空间自相关模型(ESDA),探讨 2004—2012 年区域生态效率空间格局演变和引起生态效率区域差异的成因,为国家制定区域经济与环境协调发展政策提供有益的参考。

1 中国区域生态效率测度

1993 年 P. A Nerssen 等学者基于传统 DEA 模型评价相对效率(Charnes、Cooper、Rhode 于 1978 年提出 CCR 模型)时可能出现的多个主体同时相对有效的情况下无法对多个决策单元做出进一步的评价和比较的缺陷,提出了一种 CCR 模型的改进模型,即超效率 DEA 模型。超效率 DEA 模型是由于该主体的扣除会影响到生产前沿面,通过超效率模型计算的多个主体的效率值可能都大于 1 但不相等,因此根据超效率 DEA 模型计算的有效主体相对效率,实质上表明了由于该有效主体的存在导致生产前沿面相对其不存在时生产前沿面的提升程

* 收稿日期:2014-04-25 修回日期:2015-03-14 网络出版时间:2015-05-15 12:44

资助项目:福建省教育厅科技项目

作者简介:王丽琼,女,副教授,研究方向为环境经济学,E-mail:liqiongwang@163.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20150515.1244.014.html>

度^[6]。假设有 n 个决策单元(DMU),每个决策单元有 m 种“输入”和 s 种“输出”,令 $X_j=(x_{1j},x_{2j},\cdots,x_{mj})T\geqslant 0,Y_j=(y_{1j},y_{2j},\cdots,y_{sj})T\geqslant 0$ 分别为第 j 个($j=1,2,\cdots,n$)决策单元(DMU _{j})的输入向量和输出向量,则超效率 DEA 模型的数学形式如下:

$$\min \quad [\theta - \epsilon(\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+)]$$
$$\text{s. t.} \quad \sum_n X_{ij}\lambda_j + s_i^- \leqslant \theta X_0, \sum_n Y_{rj}\lambda_j - s_r^+ = Y_0,$$
$$\lambda_j \geqslant 0, j=1,2,\cdots,n, s_r^+ \geqslant 0, s_i^- \geqslant 0.$$

式中 θ 即为单元效率评价值; λ_j 表示通过现行组合构造一个有效的决策单元 DMU _{j} 的组合比例; ϵ 是非阿基米德无穷小量(此处取 10^{-5}); S_i^- 和 S_r^+ 为基于所有投入和/或产出的松弛变量。

表 1 区域生态效率评价指标体系

指标	类别	指标构成	指标内容
投入	环境污染	废水排放	废水排放总量 COD 排放量 SO ₂ 排放量
		废气排放	烟尘排放量 工业粉尘排放量
		固废排放	工业固废产生量
	资源消耗	能源消耗	能源消耗总量
		水资源消耗	用水总量
		土地消耗	建设用地面积
		经济发展总量	地区 GDP

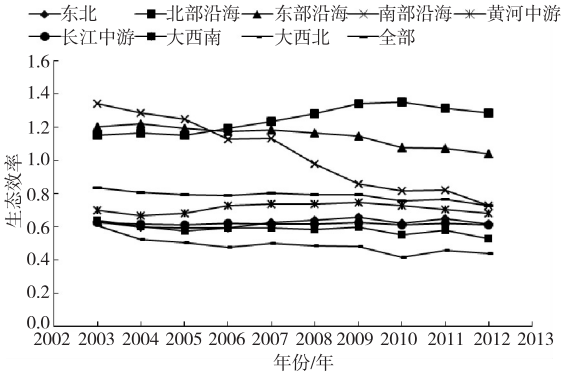


图 1 全国及八大经济区域 2003—2012 年生态效率变化趋势

生态效率注重在资源的低消耗和环境的低污染下发展经济,因此,本文将资源消耗(主要包括土地消耗、水资源消耗和能源消耗)和环境污染(主要包括废水污染、废气污染和固废污染)作为超效率 DEA 模型的投入指标,而经济效益作为模型的产出指标^[7](表 1)。同时根据国务院发展研究中心《地区协调发展的战略和政策》规划的八大经济区域(表 2),查阅 2004—2013 年《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》基础数据^[8-10],采用超效率 DEA 评价模型对中国各区域 2003—2012 年中国各区域生态效率进行了估算,并由此计算出全国及八大区域的生态效率变化趋势(图 1),西藏、台湾、香港和澳门数据缺失,不列入研究数据中。

中国的生态效率存在明显的区域差异,基本呈现 3 个层级趋势:北部沿海、东部沿海和南部沿海地区为第一层级,黄河中游、长江中游和东北地区位于第二层级,大西南和大西北地区为第三层级。北部沿海、东部沿海和南部沿海地区生态效率均值高于全国均值,其余地区生态效率均值都低于全国均值,区域生态效率差距很大程度上是因为东、中、西产业布局在空间上存在较大差异和经济发展中技术水平不同,资源消耗和污染物排放越多,生态效率越低;北部沿海生态效率总体呈明显上升趋势,北京、天津产业结构比例最优,第三产业在国民经济中占有很高的比重,科学技术创新性较高,新技术转化为现实生产力常常领先于其他区域,投入因素中环境保护和资源利用效率也高,这是北部沿海区域生态效率较高的直接原因;南部沿海生态效率则由 2003 年最高一直下降,福建、广东“两高型”行业的产值在工业总产值中所占的比重较大,固体废弃物的排放量减少,而二氧化硫、氮氧化物、工业烟尘排放量都增加,地方产业生态效率下降,其它区域变化平稳。

表 2 全国八大经济区域

经济区名称	省份	经济区名称	省份
东北综合经济区	辽宁、吉林、黑龙江	北部沿海综合经济区	北京、天津、河北、山东
东部沿海综合经济区	上海、江苏、浙江	南部沿海经济区	福建、广东、海南
黄河中游综合经济区	陕西、山西、河南、内蒙古	长江中游综合经济区	湖北、湖南、江西、安徽
大西南综合经济区	云南、贵州、四川、重庆、广西	大西北综合经济区	甘肃、青海、宁夏、新疆

2 区域生态效率全局空间自相关

2.1 全局空间自相关测度

全局空间自相关指标通过综合统计数值反映该区域整体的空间相关程度,探测在空间上属性值整体的聚集分散程度。本研究采用 Moran's I 系数来衡量全局空间自相关性,可用公式表示:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$$

式中, n 为研究区域的空间样本个数, x_i 和 x_j 表示空间样本单元的相应属性值, W_{ij} 是标准化的空间权重矩阵,采用基于共同边界的一阶 Rook 权重矩阵来反映空间单元的邻近关系。Moran's I 系数的总体统计值在 $[-1, 1]$ 之间的取值范围;值愈接近 1,表明空间单元总体正相关;值愈接近 -1,表明空间单元具有总体负相关,如果 Moran's I 接近或等于 0,表明空间单元属性之间不相关分布^[11]。

2.2 全局空间自相关分析

利用 GeoDa 软件计算和绘制 2004 年、2006 年、2008 年、2010 年和 2012 年中国区域生态效率的空间自相关指数 Moran's I 值及 Moran 散点图(图 2),其值分别为 0.212 1、0.195 9、0.208 0、0.229 9 和 0.279 9,5 年 Z 值检验达到 99% 以上的可置信水平,说明全国生态效率具有空间正相关关系,表现出较明显的空间集聚,生态效率低的省份靠近于同是低值的省份、生态效率高的省份也靠近于同是高值省份的空间集聚分布,2004—2012 年, Moran's I 值先略有下降后增长,其中 2004—2008 年空间差异扩大,空间集聚程度略有缩小,2008—2012 年生态效率空间差异缩小,省域间相似地区的空间分布趋于集聚。

3 区域生态效率局部空间自相关

3.1 局部自相关测度

由于全局 Moran's I 指数为总体自相关统计量,并不能表明每具体一个地区与邻近区域的相关程度,为揭示可能的空间变异性,本研究采用 Moran 散点图和 LISA 图深入分析局部区域的空间集聚特征,检验在统计显著下,是否存在局部地区高值或者低值^[12-13]。

3.2 生态效率 Moran 散点图

1) Moran 散点图(图 2)中的“高-高”(HH)和“低-低”(LL)象限表明中国区域生态效率空间正相关性较强,即具有均质性(集聚分布格局);“高-低”(HL)关联和“低-高”(LH)关联表示空间负相关较强,即表明研究时段内区域生态效率存在空间异质性(离散分布格局),从 2004 年、2006 年、2008 年、2010 年和 2012 年 5 年的 Moran 散点图可知,每年 30 个省份“高-高”(HH)、“低-低”(LL)、“高-低”(HL)和“低-高”(LH)空间结构都存在,位于 HH 和 LL 象限的省份数多于位于 HL 和 LH 象限的省份数,生态效率集中分布在局部范围,形成了比较明显的东部高值和中西部低值区。“高-高”(HH)显著区代表高值区域,指生态效率相对较高的省份相互临近,主要分布于东部沿海、北部沿海地区;“低-低”(LL)显著区代表低值区域,指生态效率相对较低的省份相互临近,主要分布于西北、西南、长江中游和黄河中游地区;“低-高”关联(LH)区是局部低值离群点类型,指该象限内省份生态效率较低,但周边省份生态效率较高,主要分布于长江中游部分省份和东北地区;“高-低”关联(HL)显著区是局部高值离群点类型,指该象限内省份生态效率较高,但周边省份具有较低的生态效率,主要分布于黄河中游和北部南部沿海部分地区。

2) 比较 2004 年、2006 年、2008 年、2010 年和 2012 年可知,东部沿海、西南和西北地区,空间集聚效应未发生变化,长江中游、黄河中游部分省域生态效率也保持原有的格局。2004—2012 年全国生态效率的“热点”区(高值集聚区)相对较为稳定,均分布于北部地区(北京和天津)和东部地区(上海、江苏和浙江),这主要因为北部和东部沿海地区经济发展水平较高,采用先进节能减排技术、通过调整和优化产业结构,通过发展高附加值、能耗少的产业逐步提高资源利用效率,保护生态环境,因而在保持经济增长的同时,区域生态效率也逐步提高;生态效率的“冷点”区(低值集聚区)空间格局主要分布在大西北、大西南、黄河中游、长江中游和东北地区,其中西北、

西南、黄河中游的河南、陕西以及长江中游的湖南、湖北和安徽稳定处于“冷点”区，这主要因为长江中游和黄河中游中部地区承接东部第二产业转移，经济发展过程以重工业能源资源密集型为工业主导产业结构，技术较为落后，资源能源消耗大，环境污染严重，对生态环境产生了较大不利影响，造成了研究时段内地区的生态效率呈现“冷点”（低值集聚）集中，西北、西南经济发展水平低，生产方式落后，生态效率低，其中宁夏的生态效率最低；东北三省在局部低值区域和“冷点”区交替出现，东北三省侧重发展机械、钢铁等耗能重工业，资源能源消耗量大且利用效率低，环境污染也较为严重，使辽宁、吉林、黑龙江等老工业基地生态效率低下；黄河中游中内蒙古受沿海经济发展的辐射作用，生态效率水平处于局部高值区域，而北部沿海的河北一直处于局部低值区域被周围的北京、天津和处于局部高值的内蒙古所包围，生态效率水平较低，这因为河北的很多城市接壤于北京周边，国家为了保护首都环境，将处于北京能耗大污染型产业迁移至临近的河北境内，从而也将污染转至河北，加上河北的资源消耗大，且节能减排技术落后；福建 2010 年后生态效率进入低值离散区域，同时相邻生态效率低的江西由 LH 类型区转为 LL 集聚区，这与八大区域中南部沿海生态效率由 2003 年最高一直下降相吻合。

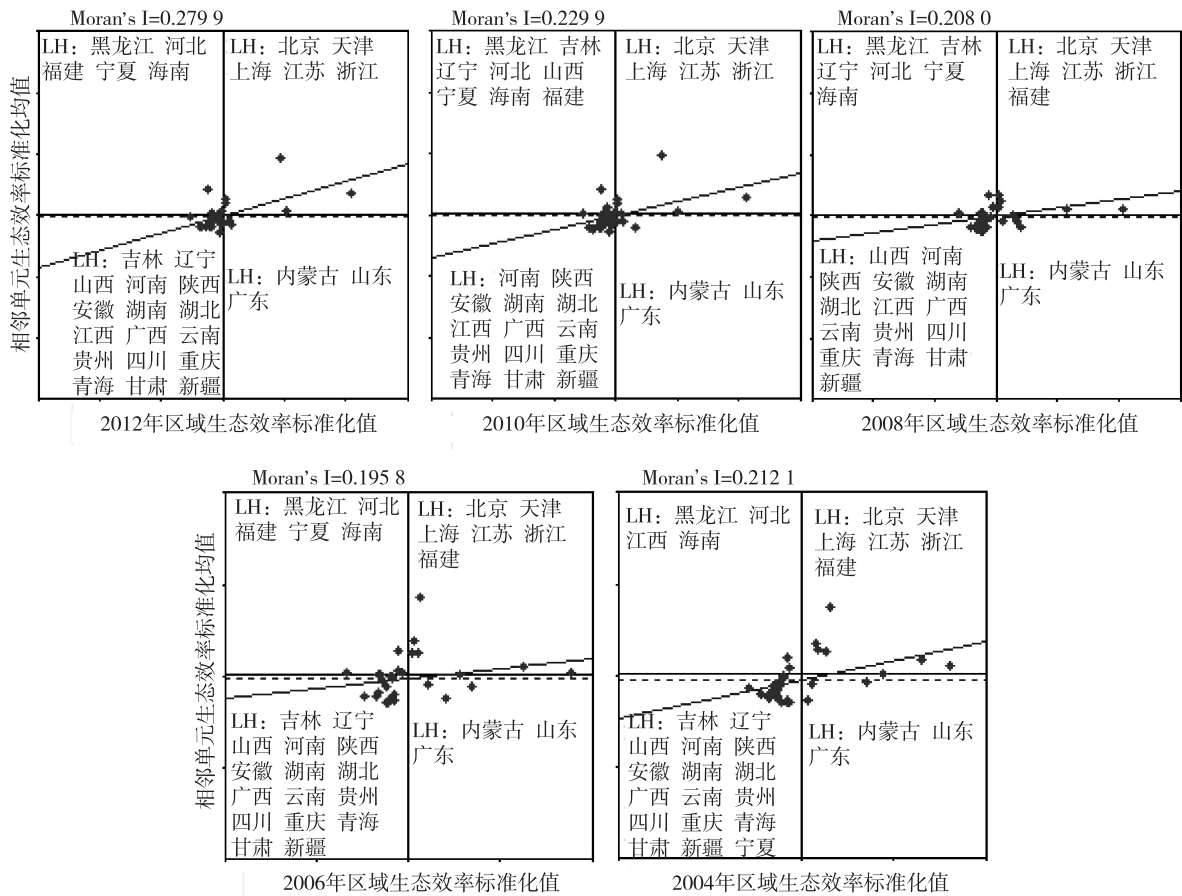


图 2 中国主要年份(2004 年、2006 年、2008 年、2010 年、2012 年)生态效率 Moran 散点图

3.3 生态效率 LISA 显著性分析

由图 3 中国生态效率的 LISA 显著性水平图可知，5 年中国生态效率的 LISA 水平图有很大程度上的相似性，北京生态效率 HH 高值区显著性明显，而四川在 LL 低值区均显著，这表明生态效率具有明显高值低值特征。2004 年 LL 类型区呈现占多数，主要分布在西北、西南和黄河中游，生态效率低的省区在空间上趋于聚集，形成连片分布格局，而并非随机性分布。在 0.05 显著性水平下，2008 年后北部沿海的河北处于局部低值区 (LH) 呈现出来，2006 年后西北甘肃和 2010 年后黄河中游陕西在低值集聚区(LL)消失，2010 年后与甘肃和陕西相邻的内蒙古处于局部高值区(HL)消失，这说明甘肃、陕西生态效率虽仍处于低值集聚区，但与周围山东和内蒙古地区生态效率差距在不断缩小；海南在 0.05 显著性水平下一直处于低高类型区显著，一直受周边广东等高生态效率区所包围，海南作为新兴发展地区，生态效率较低，国家在将海南开发为国际旅游岛的过程中利用的资

源相对较多,地方旅游业发展中产生的污染也多,因此在大力发展海南旅游业的同时,应注重提高资源利用效率。

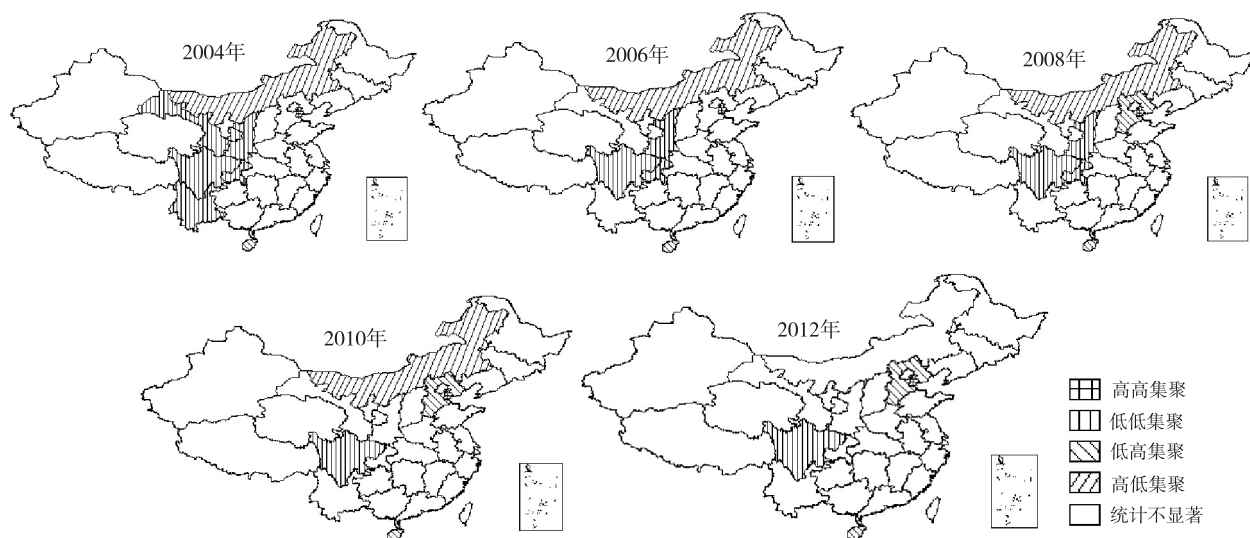


图 3 中国主要年份(2004 年、2006 年、2008 年、2010 年和 2012 年)生态效率空间集聚格局

4 结论

1) 中国生态效率区域特征呈现从东向西递减分布,在东部生态效率较高的区域内部之间的各生态效率差距较大,而中西部生态效率较低的区域内部之间的各生态效率差距较小,所以一方面应积极提高生态效率较低区域的整体效率,另一方面更要重视缩小生态效率较高区域之间差异程度。

2) 全国省域之间生态效率表现出空间正相关性,生态效率相似的地区在空间上集聚分布。“热点”区分布在北部、东部和南部沿海,生态效率的“冷点”区相对稳定,主要分布在西南、西北、黄河中游和长江中游;区域生态效率水平的分化主要与经济发展水平、区域产业结构、环境污染物排放和能源消费强度等密切相关。

3) 我国生态效率区域差异空间分析结果表明:对生态效率高的东南沿海地区重点发展现代服务业和高新技术产业,积极利用可再生能源,重视节能减排,构建循环型的经济发展方式,坚持走可持续发展道路;中西部地区生态效率低,在承载东部地区产业转移的过程中,生态环境本已脆弱将面临着更为严峻的生态压力,应积极发展附加价值高、资源消耗低、环境污染轻的产业,承接产业转移要与保护生态环境目标协调起来。

参考文献:

- [1] Willard B. The sustainability advantage: seven business case benefits of a triple bottom line[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 2002.
- [2] Schmidheiny S, Zorraquin. Financing change: the financial community, eco-efficiency, and sustainable development [M]. Cambridge: The MIT Press, 1996.
- [3] Kobayashi Y, Kobayashi H. A practical method for quantifying eco-efficiency using eco-design support tools[J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(4): 131-144.
- [4] 王恩旭, 武春友. 基于超效率 DEA 模型的中国省际生态效率时空差异研究[J]. 管理学报, 2011, 8(3): 443-450.
Wang E X, Wu C Y. Spatial-temporal differences of provincial eco-efficiency in China based on super efficiency DEA model[J]. Chinese Journal of Management, 2011, 8(3): 443-450.
- [5] 付丽娜, 陈晓红. 基于超效率 DEA 模型的城市群生态效率研究——以长株潭“3+5”城市群为例[J]. 中国人口资源与环境, 2011, 23(4): 169-175.
Fu L N, Chen X H. Urban agglomerations eco-efficiency analysis based on super-efficiency DEA model: case study of Chang-Zhu-Tan 3+5 urban agglomeration[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 23(4): 169-175.
- [6] 王奇, 李明全. 基于 DEA 方法的我国大气污染治理效率评价[J]. 中国环境科学, 2012, 32(5): 942-946.
Wang Q, Li M Q. Study on air pollution abatement efficiency of China by using DEA[J]. China Environmental Science, 2012, 32(5): 942-946.
- [7] 罗能生, 李佳佳. 中国城镇化进程与区域生态效率关系的

- 实证研究[J]. 中国人口资源与环境, 2013, 23(11): 53-59.
- Luo N S, Li J J. Empirical analysis on the relationship between the China urbanization and regional eco-efficiency [J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(11): 53-59.
- [8] 中国国家统计局. 中国统计年鉴(2004—2013)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004—2013.
- National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2004—2013.
- [9] 中国国家统计局. 中国环境统计年鉴(2004—2013)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004—2013.
- National Bureau of Statistics of China. China environment statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2004—2013.
- [10] 中国国家统计局. 中国能源统计年鉴(2004—2013)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2004—2013.
- National Bureau of Statistics of China. China energy statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2004—2013.
- [11] 侯光雷, 王志敏. 基于探索性空间分析的东北经济区城市竞争力研究[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(4): 67-72.
- Hou G L, Wang Z M. Study on urban competitiveness within northeastern economic zone of China based on an exploratory spatial data analysis[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(4): 67-72.
- [12] 赵雲泰, 黄贤金, 钟太洋, 等. 1999—2007 年中国能源消费碳排放强度空间演变特征[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3145-3152.
- Zhao Y T, Huang X J, Zhong T Y, et al. Spatial pattern evolution of carbon emission intensity from energy consumption in China [J]. Environmental Science, 2011, 32(11): 3145-3152.
- [13] 王丽琼. 基于探索性空间分析的中国氮氧化物排放强度研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(3): 494-497.
- Wang L Q. Study on NO_x emission intensity of China based on an exploratory spatial data analysis[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(3): 494-497.

Analysis of the Spatial-temporal Pattern of Eco-efficiency Based on SE DEA-ESDA in China

WANG Liqiong

(School of Resources & Environmental Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou Fujian 362000, China)

Abstract: The eco-efficiency for different regions and periods in China was calculated based on Super Efficiency DEA, and using the global and local spatial autocorrelation(ESDA), the spatial autocorrelation and spatial heterogeneity of eco-efficiency was analyzed. The results are as followed: the eco-efficiency has a significant difference in eastern, central and western areas, with showing the highest eco-efficiency over eastern developed regions, and the lowest one over central and western less-developed regions; spatial autocorrelation analysis shows that Global Moran's I were positive spatial correlations among provincial regions in China, indicating that there were regions of similar eco-efficiency agglomerated in space, and the degrees of spatial agglomeration first decreased and then increased. For the urban competitiveness of spatial heterogeneity it can be found that the "hot spot" areas of eco-efficiency were relatively stable, in the eastern and west regions, while the "cold spot" areas were in the Yellow River regions and northeast regions; spatial disparity of eco-efficiency is closely related to factors such as economic development, industrial structure and energy utilization intensity. Based on the global and local spatial autocorrelation, the study of spatial heterogeneity of eco-efficiency in China provides references for the development of differential regional objectives of eco-efficiency increase and related regulation policies.

Key words: eco-efficiency; SEDEA-ESDA; global spatial autocorrelation; local spatial autocorrelation

(责任编辑 陈 琴)